

Научная статья
УДК 629.331

Динамические испытания в условиях реальной эксплуатации транспортного средства

Антон Вячеславович Александров¹, Иван Алексеевич Долгов²,
Тимофей Викторович Морозкин³, Дмитрий Сергеевич Конюшков⁴

^{1,2,3,4}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

^{1,2,3,4}madilab@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена задаче выстраивания обратной связи с автомобилем в период его эксплуатации. В ней проводится анализ задач, при решении которых требуется наличие обратной связи с автомобилем, выясняются причины, почему данной проблематике уделяется недостаточно внимания и рассматриваются методики получения наиболее информативных данных с наименьшими затратами. При написании статьи авторы опирались на результаты своей профессиональной деятельности, которая заключается в разработке и применении на практике методик диагностирования автомобильных ДВС. Наименее затратным и технически просто реализуемым является получение данных от контроллера ЭСУД. Для повышения информативности таких данных требуется выполнить их обработку в соответствии с решаемыми задачами и организовать каталогизацию. Получить информацию о протекании рабочего процесса в цилиндрах двигателя можно при помощи индицирования – прямого или косвенного. Осуществление прямого индицирования трудоемко и затратно, поэтому с помощью прямого индицирования авторы статьи разрабатывают методику косвенного индицирования, базирующуюся на анализе изменения мгновенной скорости коленчатого вала, получаемой в результате обработки сигнала ДПКВ. Перспективный комплекс обратной связи с автомобилем в период эксплуатации большую часть данных о работе двигателя должен получать от контроллера ЭСУД, но для контроля генерируемого крутящего момента на основании данных косвенного индицирования комплекс с помощью АЦП должен регистрировать сигнал ДПКВ.

Ключевые слова: индицирование, косвенное индицирование, система сбора и обработки данных, самодиагностика, угловая скорость и ускорение коленчатого вала, кинетическая энергия подвижных деталей ДВС, жизненный цикл автомобиля.

Для цитирования: Александров А.В., Долгов И.А., Морозкин Т.В., Конюшков Д.С. Динамические испытания в условиях реальной эксплуатации транспортного средства // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 3 (41).

Dynamic tests in real vehicle conditions

Anton V. Aleksandrov¹, Ivan A. Dolgov², Timofey V. Morozkin³, Dmitriy S. Konyushkov⁴

^{1,2,3,4}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

^{1,2,3,4}madilab@mail.ru

Abstract. The report is devoted to the problem of building feedback with the car during its operation. It analyzes the problems that require feedback from the vehicle, clarifies the reasons why insufficient attention is paid to this issue, and discusses methods for obtaining the most informative data at the lowest cost. When working on the report, the authors relied on the results of their professional activities, which consists in the development and application in practice of diagnostic techniques for automobile internal combustion engines. The least costly and technically easy to implement is getting data from the engine management system controller. To increase the information content of such data, it is required to organize their correct processing and cataloging. You can get information about the progress of the working process in the engine cylinders by means of indication - direct or indirect. The implementation of direct indication is laborious and costly, therefore, with the help of direct indication, the authors of the report develop an indirect indication method based on the analysis of changes in the instantaneous crankshaft speed obtained as a result of processing the signal from the crankshaft position sensor. A promising complex of feedback with a car during operation should receive most of the data on engine operation from the ECM, but to calculate the generated torque, the complex must register a signal from the crankshaft position sensor using an ADC.

Keywords: indication, indirect indication, data collection and processing system, self-diagnosis, angular velocity and acceleration of the crankshaft, kinetic energy of moving parts of the internal combustion engine, vehicle life cycle.

For citation: Aleksandrov A.V., Dolgov I.A., Morozkin T.V., Konyushkov D.S.
Dynamic tests in real vehicle conditions. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. No. 3 (41).

Введение

При создании двигателя и его системы управления обычно известны условия, в которых он будет эксплуатироваться. Далее прототип двигателя устанавливают на моторный стенд и с помощью инженерного блока управления проверяют соответствие всех его характеристик заданным. Затем,

уже в составе автомобиля, двигатель выходит на дорожные испытания, в процессе которых, обвешанный множеством дополнительных датчиков, происходит его проверка в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным. При этом по результатам тестовых поездок и в конструкцию, и в программу управления вносятся некоторые изменения. Одной из задач таких тестовых поездок является отработка системы самодиагностики – как система управления должна реагировать и как реагирует на возникновение неисправностей.

После этого автомобиль переходит в другую стадию своего жизненного цикла. На этом этапе у большинства современных ЭСУД в качестве обратной связи имеется только сигнальная лампа возникновения неисправности – ее включение информирует о необходимости обратиться на СТО.

Задачи выстраивания «обратной связи» с автомобилем в условиях эксплуатации ТС

Есть ли уверенность, что в автомобиле, который с одной стороны является сложным технологическим продуктом, а с другой - товаром массового производства, сделанным, к тому же в сжатые сроки, управление рабочим процессом происходит оптимально? И если случается какая-либо неисправность, то сколь адекватно будет в таком случае работать система самодиагностики?

Система самодиагностики автомобиля вообще и двигателя в частности лучше всего справляется с очевидными неисправностями – обрывами проводов или выходом значений датчиков за установленные границы. В таком случае сообщения самодиагностики вполне конкретны и на их основании легко локализовать возникшую неисправность. В случае более сложных неисправностей – нарушения взаимной согласованности показаний датчиков, то есть выход их сигналов за рамки математической модели – разработчики систем управления двигателя предлагают различные тест-

блоки, помогающие локализовать неисправность. При возникновении неисправности регистрируется также и сопутствующая информация – режим движения, показания некоторых датчиков и параметры управления. Очень часто этой информации, предоставляемой системой самодиагностики, бывает недостаточно, поэтому наибольшее влияние на скорость и правильность диагностических действий зависит от компетентности инженера-диагноста, выполняющего эти действия.

Комплексного подхода, позволяющего получать полноценную обратную связь от автомобиля в процессе его эксплуатации, на сегодняшний день нет. Это можно объяснить несколькими причинами:

1. Техническая возможность получения данных от контроллера ЭСУД, как и сам контроллер, как неотъемлемая часть систем управления, появилась менее 30 лет назад.
2. «Разработка» и «Эксплуатация» относятся к различным периодам жизненного цикла автомобиля, поэтому методики «обратной связи», используемые при разработке и доводке экономически не целесообразно переносить на период эксплуатации.
3. Для широкого использования методик «обратной связи» должен быть соответствующий уровень технического персонала, сопровождающего автомобиль на этапе эксплуатации.

Автомобильная отрасль очень динамично развивается и то, что казалось фантастикой, например, беспилотные автомобили, сейчас уже считается не столь отдаленной перспективой. В этой связи и методики получения устойчивой «обратной связи» с автомобилем в процессе эксплуатации становятся все более актуальными [1].

Рассмотрим, для решения каких задач это является актуальным:

1. Комплекс задач, связанных с организацией дорожного движения, режимом движения, планировании маршрута.

2. Уточнение режимов эксплуатации автомобиля и двигателя, анализ работы системы управления на этих режимах, а также анализ изменения характеристик двигателя и компонентов системы управления с течением времени. Такая «обратная связь» актуальна для производителей автомобилей, а также аналитических центров типа «Автомобиль – Среда – Дорога».

3. Контроль за состоянием автомобилей индивидуальных клиентов (абонентов) сервисных центров или парка собственных автомобилей (АТП). Такой контроль позволяет своевременно обнаружить и даже спрогнозировать наступление отказа некоторых элементов двигателя и системы управления, а также ускорит локализацию неисправности при возникновении комбинированных отказов.

4. Контроль работы автомобиля в случае изменения программы управления, а также при эксплуатации автомобиля на режимах, отличающихся от расчетных.

Анализ имеющихся возможностей для получения «обратной связи» с автомобилем в условиях эксплуатации ТС

Информацию, которую можно получить от автомобиля в качестве «обратной связи» следует разделить на две группы:

1. *Информация, получаемая от контроллера ЭСУД по цифровой шине обмена данными.*

На сегодняшний день подавляющее число выпускающихся автомобилей имеют стандартизированный разъем для подключения диагностического оборудования, через него также можно в функции времени регистрировать – записывать в файл – некоторые параметры работы двигателя. Тенденцией мирового автомобилестроения является расширение возможностей доступа к информации, имеющейся у контроллера ЭСУД – увеличение количества доступных параметров с размещением этих данных на серверах, доступных заинтересованным сторонам.

Получение данных от контроллера ЭСУД требует минимальных технических затрат, но существенным недостатком таких данных, является их «субъективность». В случае различных нарушений сигналы датчиков искажаются, при этом и оценка режима работы, и управляющие воздействия, контроллером определяются неверно. Это особенно важно при определении генерируемого двигателем крутящего момента, так как его расчет контроллер выполняет по математической модели с учетом сигналов датчиков.

2. *Информация, получаемая по каналам, независимым от контроллера ЭСУД. Такая информация может быть получена от дополнительных датчиков, размещенных на двигателе, либо в результате независимой от контроллера ЭСУД обработки сигналов штатных датчиков.*

Размещение дополнительных датчиков на автомобиле весьма затратное и может быть оправдано только при наличии конкретных задач исследования, либо при проведении углубленной диагностики в случае возникновения сложных неисправностей.

Информация о протекании рабочего процесса в цилиндрах двигателя является наиболее важным информационно-диагностическим параметром, но непосредственное ее получение – индицирование – является очень затратным и трудоемким. Поэтому индицирование в условиях эксплуатации используется достаточно редко [2]. Альтернативой непосредственному индицированию выступают различные методики косвенного индицирования [3]. Коленчатый вал воспринимает крутящие моменты, генерируемые в результате рабочих процессов во всех цилиндрах двигателя, его угловая скорость и ускорение зависят от характера их протекания. При разработке методик косвенного индицирования, основанных на обработке сигнала ДПКВ, требуется наиболее полно учесть все факторы, влияющие на параметры вращения коленчатого вала и на их фоне выявить влияние рабочего процесса.

При проведении ряда исследовательских работ и углубленной диагностики интерес также может представлять шум и вибрация силового агрегата. Для их изучения используются соответствующие датчики. Если обрабатывать сигналы этих датчиков совместно с сигналом ДПКВ, то шум и вибрацию можно синхронизировать с процессами в ДВС.

Практическая реализация «обратной связи» с автомобилем в процессе эксплуатации

В проблемной лаборатории транспортных двигателей (ПЛТД) МАДИ более 15 лет назад началась разработка диагностического комплекса (ДК) ДВС. Промежуточные итоги работ с практическими примерами использования ДК ДВС при диагностировании автомобилей докладывались на МАНФ-2007. Первая версия комплекса базировалась на 16-канальной АЦП, установленной в слот PCI ПК, то есть была стационарной.

В процессе использования комплекса для диагностирования автомобилей со сложными неисправностями и проведении исследовательских работ – появилось видение его дальнейшего развития, а также образовался перечень задач, для решения которых было бы актуально использование комплекса. Стало понятно, что для решения многих задач комплекс должен быть мобильным, несколько лет назад была создана его мобильная версия. Количество датчиков и исполнительных органов в современном автомобильном двигателе кратно возросло, поэтому в мобильной версии комплекса увеличилось число одновременно регистрируемых линий данных.

Для получения информации о протекании рабочего процесса – индицировании – в нашей лаборатории был разработан миниатюрный датчик давления, на который в 2018 году был получен патент. На рисунке 1а представлена конструкция датчика, на рисунке 1б представлен датчик, интегрированный в свечу зажигания.



Рис. 1. а – конструкция миниатюрного датчика давления, б – датчик давления совмещенный со свечей зажигания (датчик-свеча)

Теперь имеется возможность выполнять тестовые поездки на автомобиле с подключенным диагностическим комплексом, в том числе и индицирование ДВС в дорожных условиях [4]. Сейчас ДК ДВС используется при проведении различных исследований работы двигателя в составе транспортного средства (рис. 2).



Рис. 2. Автомобиль с подключенным ДК ДВС

Хорошая корреляция между генерируемым двигателем крутящим моментом и ускорением коленчатого вала известна давно и очевидна (рис. 3), но для расчета крутящего момента на основании изменения угловой скорости коленчатого вала требуется методика косвенного индицирования [5]. Сейчас мы работаем над такой методикой, используя данные прямого индицирования, несколько подробнее про это будет сказано позже.

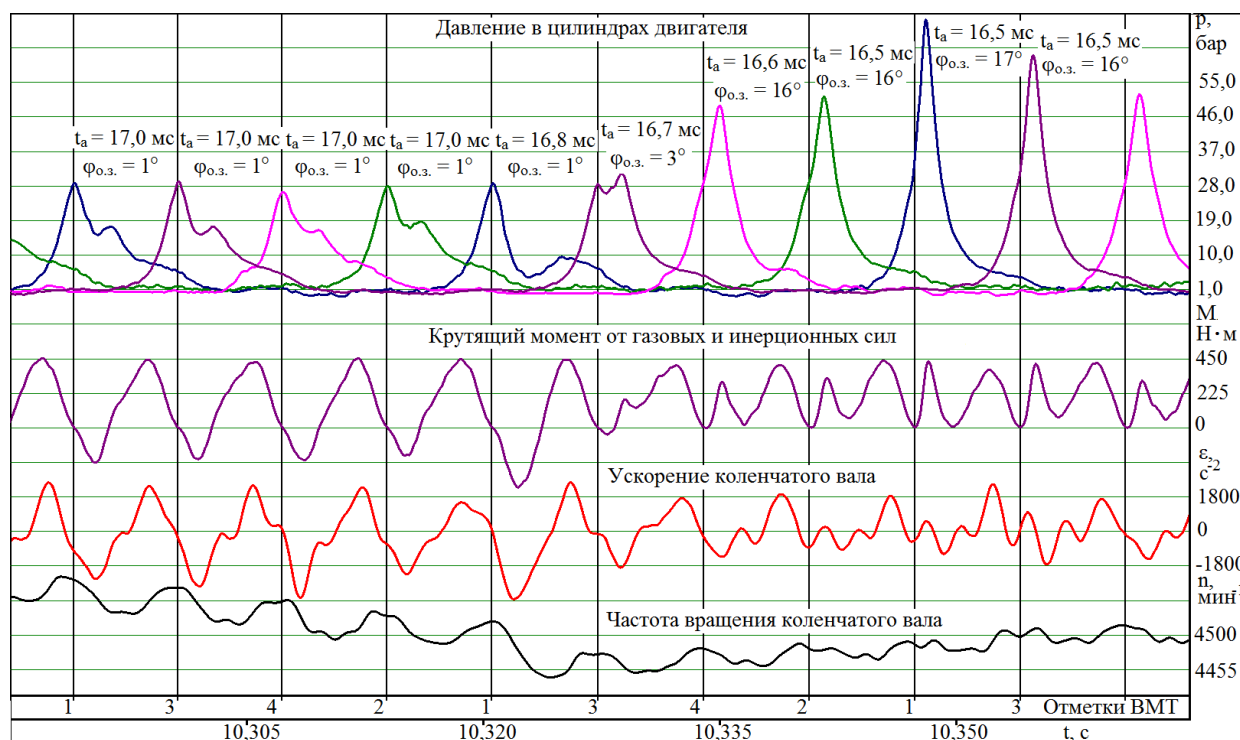


Рис. 3. Фрагмент работы ДВС в момент резкого изменения генерируемого крутящего момента

Обработка данных, получаемых от контроллера ЭСУД

Получение данных от контроллера ЭСУД через диагностический разъем – это наиболее простой, с точки зрения технической реализации, способ получения «обратной связи» с автомобилем. Эти данные, даже если они анализируются без данных прямого или косвенного индицирования, могут быть достаточно информативны, при этом решающее значение имеет способ их обработки и систематизации (рис. 4).

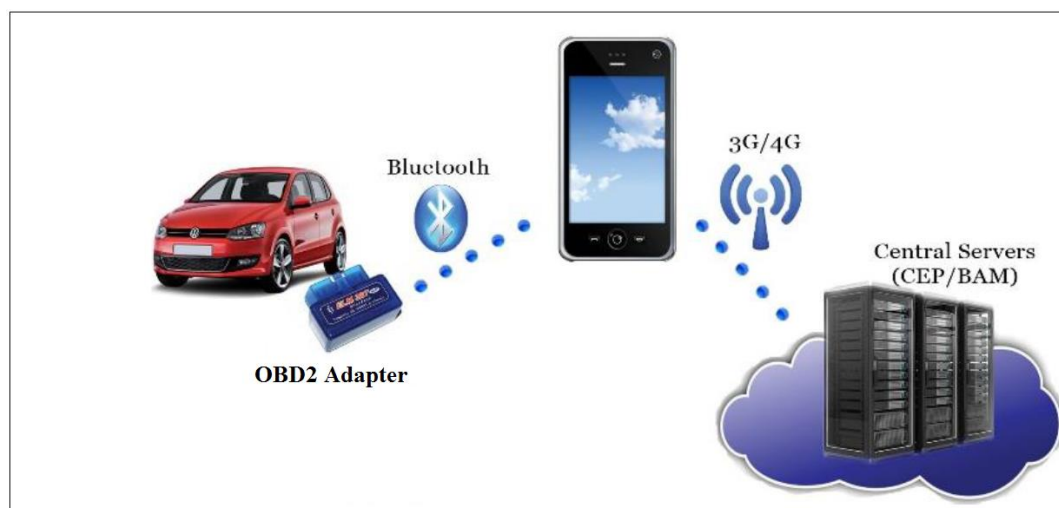


Рис. 4. Конфигурация для дистанционного получения параметров работы двигателя

В зависимости от задач исследования данные, полученные от контроллера ЭСУД, целесообразно анализировать по различным методикам:

1. *В функции времени.* Для такого анализа подходят фрагменты относительно малой длительности – десятки секунд и выраженной причинно-следственной связью – когда какое-то событие влечет за собой изменение параметров работы (рис. 5). В данном примере нажатие на педаль акселератора вызывает соответствующие действия системы управления, приводящие к увеличению скорости движения автомобиля.



Рис. 5. Пример фрагмента данных от контроллера ЭСУД в функции времени

2. *В функции режима работы.* Для этого данные, регистрируемые в функции времени, следует рассматривать в функции режима работы ДВС. Чтобы в поле режимов не было «лишних» данных – формально, по режимным параметрам, относящихся к данному режиму, но по другим параметрам, выпадающим из него и размывающие результат, нужно использовать механизм фильтрации. Для решения задачи сортировки больших (несколько часов) временных фрагментов работы двигателя в условиях реальной эксплуатации, а также их фильтрации, была написана программа DataConvert. Эта программа позволяет назначать любые два из зарегистрированных или рассчитанных на их основании параметров, в качестве определяющих режим, а остальные параметры рассматривать в их функции. В программе также имеются фильтры, позволяющие исключать из рассмотрения определенные режимы работы двигателя.

При таком способе обработки полученных данных появляется возможность сравнивать между собой параметры работы и управления двигателя, полученные в различные периоды времени, а также однотипные двигатели различных автомобилей.

Данные от контроллера ЭСУД являются альтернативой регистрации осциллограмм сигналов датчиков и исполнительных органов при углубленном исследовании работы ДВС – прямом или косвенном индицировании.

Методика косвенного индицирования, основанная на обработке сигнала ДПКВ и данных прямого индицирования

При обработке сигнала ДПКВ можно получить угловую скорость и её изменение – ускорение – коленчатого вала. Но на коленчатый вал, помимо крутящих моментов от внешних сил – газовых, полезной нагрузки и сил сопротивления, действуют внутренние – инерционные. Они не меняют суммарную кинетическую энергию подвижных деталей двигателя, но меняют угловую скорость коленчатого вала. Чтобы исключить из рассмотрения их

влияние, следует анализировать не угловую скорость вала, а суммарную кинетическую энергию подвижных деталей ДВС. При разработке методики косвенного индицирования было принято решение использовать две формы связи между крутящим моментом и вращением вала – дифференциальную и интегральную (рис. 6). Дифференциальная форма связывает мгновенное ускорение коленчатого вала и суммарный крутящий момент, действующий на него; интегральная – изменение кинетической энергии подвижных деталей двигателя за некоторый угловой промежуток с работой внешних сил на этом же промежутке.

Дифференциальная связь между крутящим моментом и вращением вала:

$$\varepsilon = \frac{\sum M}{J_{\kappa}}$$

Интегральная связь между крутящим моментом и вращением вала:

$$\Delta E_{\text{кин}} = A_e, \text{ где:}$$

$$\sum M_{\text{внеш}} = M_{\Gamma} + M_{\text{пн}} + M_{\text{с}};$$

$$\sum M = M_{\Gamma} + M_{\text{пн}} + M_{\text{с}} + M_{\text{и}};$$

$$\Delta E_{\text{кин}} = \frac{J_{\kappa}(\omega^2(\varphi_{\kappa}) - \omega^2(\varphi_{\text{и}}))}{2} + \frac{m_{\text{и}}(v_{\text{н}}^2(\varphi_{\kappa}) - v_{\text{н}}^2(\varphi_{\text{и}}))}{2};$$

$$A_e = \int_{\varphi_{\text{и}}}^{\varphi_{\kappa}} \sum M_{\text{внеш}} d\varphi.$$

Рис. 6. Схема связей между крутящим моментом и вращением коленчатого вала

Для расчета кинетической энергии подвижных деталей ДВС требуется знать кинематику КШМ, момент инерции вращающихся деталей, массу поршня, массу шатуна и его момент инерции. Из всех перечисленных параметров наибольшую сложность представляет определение момента инерции вращающихся деталей. Эта задача – экспериментальное определение момента инерции вращающихся деталей ДВС на основании действия инерционных сил от поршней и шатунов – была решена в процессе работы над магистерской диссертацией Морозкина Т.В. [3]. После определения всех указанных параметров кинетическая энергия подвижных

деталей ДВС рассчитывается как функция частоты вращения и углового положения коленчатого вала.

Следующим шагом разрабатываемой методики косвенного индицирования будет определение момента сил сопротивления в ДВС как функции частоты вращения, нагрузки и углового положения коленчатого вала.

Далее, полагая, что момент полезной нагрузки по углу поворота меняется незначительно, предстоит получить зависимость между определяемым на основании прямого индицирования крутящим моментом и определяемым на основании сигнала ДПКВ изменением кинетической энергии подвижных деталей ДВС. Если по результатам индицирования в дорожных условиях будет доказано, что крутящий момент, рассчитанный на основании сигнала ДПКВ, с заданной точностью соответствует крутящему моменту, полученному при индицировании, то задачу косвенного индицирования можно считать решенной.

Перспективы создания комплекса, позволяющего получать обратную связь с автомобилем в процессе его эксплуатации

Комплекс, позволяющий реализовать «обратную связь» с автомобилем в процессе его эксплуатации, должен сочетать в себе простоту, надежность, малые габариты и высокую информативность. Это возможно получить, сочетая получение данных от контроллера ЭСУД и регистрацию осциллограмм штатных и дополнительных датчиков. Значительную часть параметров работы двигателя, причем в нормированном виде, можно получать, избегая трудоемкое подключение к линиям данных, непосредственно от контроллера ЭСУД, проводить их первичную обработку и дистанционно пересылать в мониторинговый центр, там они должны составлять базу данных. Техническое решение – адаптер, устанавливаемый в диагностический разъем автомобиля, работающий по беспроводной связи с мобильным устройством – существует достаточно давно.

Для принципиального расширения возможностей комплекса помимо цифровой линии связи с контроллером ЭСУД, в нем требуется наличие нескольких каналов АЦП для возможности подключения сигнала ДПКВ и дополнительных внешних датчиков – давления в цилиндрах, акселерометров. То есть схема, представленная на рис.4, будет выглядеть таким образом (рис. 7).

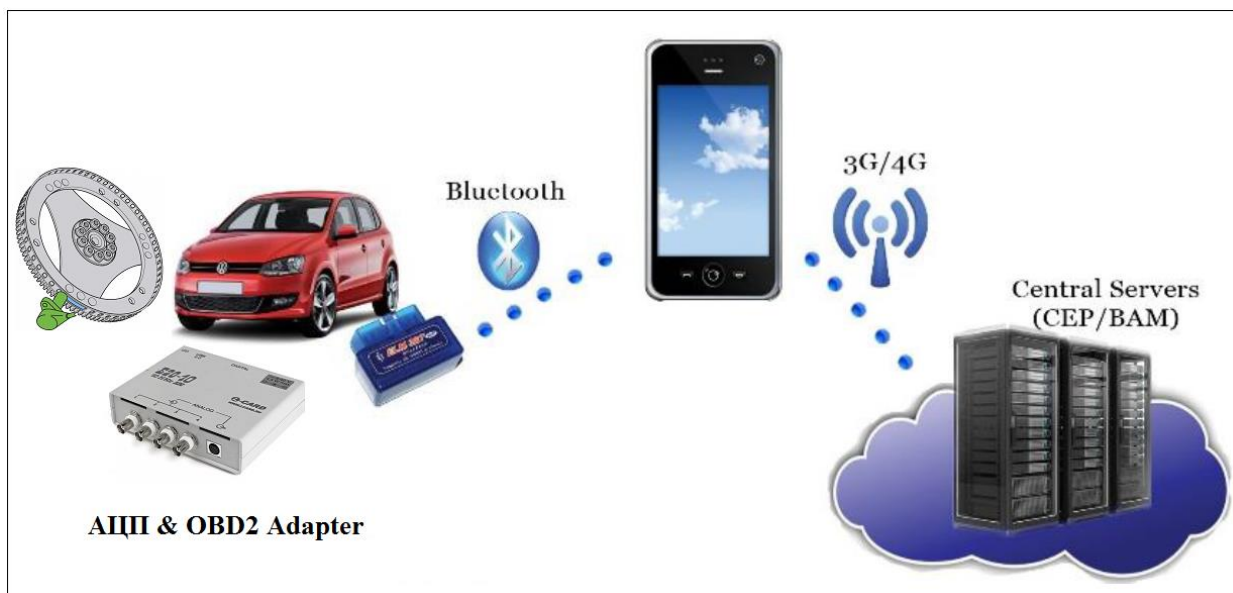


Рис. 7. Схема перспективного комплекса получения обратной связи с автомобилем

Заключение

По результатам тестовой поездки с датчиками давления в цилиндрах определяются калибровки для конкретного двигателя. В дальнейшем, уже без датчиков давления, с применением методики косвенного индицирования появляется возможность определять мгновенный крутящий момент, генерируемый двигателем, то есть появляется возможность отслеживать протекание рабочего процесса в цилиндрах двигателя.

На настоящий момент такой комплекс отсутствует, но мы уже работаем над его прототипом.

Повышение сложности систем управления двигателем рождает запрос на механизмы обратной связи с ним в условиях эксплуатации. Основная

задача на этом пути – составить оптимальный алгоритм сбора, обработки и каталогизации получаемых данных.

Список источников

1. Cloud-Based Driver Monitoring and Vehicle Diagnostic with OBD2 Telematics / M. Amarasinghe, S. Kottegoda, A. Arachchi, S. Muramudalige, D. Bandara, A. Azeez // *International Journal of Handheld Computing Research*. – 2015. – Vol. 6. – № 4. – P. 18. – DOI 10.4018/IJHCR.2015100104.
2. Долгов, И. А. Актуальность индицирования ДВС / И. А. Долгов, А. В. Александров // *Журнал автомобильных инженеров*. – 2016. – № 5(100). – С. 19-23. – EDN YRKCCJ.
3. Морозкин, Т.В. Исследование корреляции крутящего момента от газовых сил и динамики вращения коленчатого вала на различных режимах работы ДВС: специальность: 13.04.03: дис. ... магистра / Морозкин Т.В.; МАДИ. – Москва, 2020. – 81 с.
4. Долгов, И. А. Мобильный комплекс для регистрации и обработки параметров работы автомобильного двигателя / И. А. Долгов, А. В. Александров // *Журнал автомобильных инженеров*. – 2017. – № 2(103). – С. 11-17. – EDN YQFRLV.
5. Александров, А. В. Индицирование двигателя на переходных режимах / А. В. Александров, Т. В. Морозкин // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : Сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 31 января 2019 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2019. – С. 270-282. – EDN QEVTGF.

References

1. Amarasinghe M., Kottegoda S., Arachchi A., Muramudalige S., Bandara D., Azeez A. *International Journal of Handheld Computing Research*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 18, DOI 10.4018/IJHCR.2015100104..
2. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2016, no. № 5(100), pp. 19-23.
3. Morozkin T.V. *Issledovanie korrelyatsii krutjashhego momenta ot gazovyh sil i dinamiki vrashheniya kolenchatogo vala na razlichnyh rezhimah raboty DVS* (Investigation of the correlation of torque from gas forces and the dynamics of rotation of the crankshaft in various operating modes of the internal combustion engine), Master's thesis, Moscow, MADI, 2020, 81 p.

4. Alkexandrov A.V., Dolgov I.A. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2017, no 2 (103), pp. 11-17.

5. Alexandrov A.V., Morozkin T.V. 8-e Lukaninskie chtenija. Problemy i perspektivy razvitija avtotransportnogo kompleksa. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Moscow, 2019, pp. 270-282.

Рецензент: Дунин А.Ю., д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Александров Антон Вячеславович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Долгов Иван Алексеевич, канд. техн. наук, инженер, МАДИ.

Морозкин Тимофей Викторович, аспирант, МАДИ.

Конюшков Дмитрий Сергеевич, заведующий лабораторией, МАДИ.

Information about the authors

Aleksandrov Anton V., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Dolgov Ivan A., Candidate of Sciences (Technical), engineer, MADI.

Morozkin Timofey V., postgraduate, MADI.

Konyushkov Dmitriy S., head of Laboratory, MADI.

Статья поступила в редакцию 24.06.2024; одобрена после рецензирования 09.07.2024; принята к публикации 10.09.2024.

The article was submitted 24.06.2023; approved after reviewing 09.07.2024; accepted for publication 10.09.2024.